

SiC_f/SiC 복합재료의 굽힘 강도 특성 및 균열 치유 효과

Bending Strength and Crack Healing of SiC_f/SiC Composite Material

안석환* · 도재윤** · 문창권*** · 남기우****†

Seok-Hwan Ahn*, Jae-Yoon Do**, Chang-Kwon Moon*** and Ki-Woo Nam****†

(접수일 : 2013년 03월 27일, 수정일 : 2013년 06월 28일, 채택확정 : 2013년 07월 05일)

Abstract: Manufactured SiC_f/SiC composites by NITE method was investigated fracture characteristics according to the size of the surface crack. Coated surface crack with a SiO₂ colloid in several ways was evaluating the possibility of healing. The strength of CCS and UCS is 313 and 230MPa, respectively and it is about 1/3 of the SPS. Bending strength of SiC_f/SiC composites has no effect with the pre-crack size to the critical crack size. SiC_f/SiC composites can not generate large amount of SiO₂ oxides to the bottom of crack, and is only generated randomly on surfaces, and can not contribute to the recovery of bending strength.

Key Words : SiC_f/SiC Composite Material, Crack Healing, Bending Strength

1. 서 론

SiC_f/SiC 복합재료는 내열구조재료로서 세계적으로 연구되고 있다.^{1,2)} 특히 섬유에 코팅층을 형성시킨 SiC_f/SiC 복합재료를 만들어 인성의 향상을 도모하고³⁾, 또 다양한 SiC 복합재료를 제조하여 강도 평가 및 균열 치유를 실시하는 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.^{4,5)} 그러나 차세대 에너지원으로 기대되는 핵융합 발전 특히, 핵융합로 블랭킷 제1벽에 적용될 SiC계 세라믹스의 균열치유 연구는 아직 미흡한 상태이다. 특히 우리나라는 할당된 조달품목의 개발·제작 및 전문 인력 양성 등을 위하여, SiC_f/SiC 복합재료의 블랭킷 및

열차폐체 적용을 위한 설계 및 기술적 기반 마련이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고효율 가스 터빈의 터빈 블레이드 및 핵융합로의 노벽구조에 사용될 SiC_f/SiC 복합재료를 제조한 후, 비커스 압자에 의한 미세 균열의 크기를 제어하여, 이에 따른 균열의 배향 상관성 및 상온 강도 특성을 분석하고 SEM을 통한 균열 진전 거동을 관찰하는 등의 기계적 특성 분석을 실시하였다.

또한 SiC_f/SiC 복합재료의 적용에 있어 신뢰성 및 경제성의 확보를 위하여 세라믹스의 균열 치유 현상을 SiC_f/SiC 복합재료에 적용시키기 위한 연구를 진행하였다. 특히 기존의 연구에서 균열 치유

**** 남기우(교신저자) : 부경대학교 재료공학과

E-mail : namkw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6358

*안석환 : 부경대학교 링크사업단

**도재윤 : 한국폴리텍대학 부산캠퍼스

***문창권 : 부경대학교 재료공학과

****† Ki-Woo Nam(corresponding author) : Materials Science and Engineering, Pukyong National University.

E-mail : namkw@hpkn.ac.kr, Tel : 051-629-6358

*Seok-Hwan Ahn : Leaders in Industry-University Cooperation, Pukyong National University

**Jae-Yoon Do : Busan Campus of Korea Polytechnic VII

***Chang-Kwon Moon : Materials Science and Engineering, Pukyong National University.

물질로 알려진 SiO₂ 산화물의 효과적인 형성을 위하여 다양한 코팅법을 이용하여 SiO₂ 콜로이드를 코팅한 후, SiC_f/SiC 복합재료의 균열치유 현상을 조사하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 실험방법

SiC_f/SiC 복합재료(SiC fiber reinforced SiC matrix)는 NITE(Nano-powder Infiltration and Transient Eutectic)법을 이용하여 제조하였다.⁶⁾ 섬유 보강재로서 열분해탄소(PyC)가 코팅된 SiC 섬유(Tyranno SA, 섬유직경 7.5 μ m, PyC층 두께 500nm, 1600f/b, Ube Industries, Ltd, Ube, Japan)를 사용하였다.⁷⁾

원료 분말은 90wt.% β -SiC 나노입자(Hefei Kiln Nanometer Technology Development Co., Ltd, 평균 입경 100nm)에 소결보조제 6wt.% Al₂O₃(고순도 화학, 일본, 평균 입경 0.3 μ m) 및 4wt.% Y₂O₃(고순도 화학, 일본, 평균 입경 0.4 μ m)를 90:10의 비율로 에탄올과 혼합한 후 24시간 볼 밀링(Ball-milling)을 실시하여 슬러리를 제조하였다. 그리고 보강재로 사용된 1600f/b의 Tyranno-SA SiC 장섬유는 소결체의 사이즈에 맞게 커팅한 후, 슬러리가 가능한 치밀하게 함침되도록 필라멘트를 분리하여 배향시켰다. 이때 섬유의 배향에 따른 특성을 분석하기 위하여 섬유를 일방향 및 직교 방향으로 배향하여 적층시켰으며, 이에 제조한 슬러리를 롤링 처리함으로써 섬유를 함침시켰고(섬유체적비율 40-50%), 이를 통해 제작된 SiC_f/SiC 성형체를 자연 건조시킨 후, 소결하였다.

SiC_f/SiC 복합재료의 소결은 고온가압소결(Hot-press)방식으로 실시하였으며, 건조된 성형체를 20MPa의 압력 하의 아르곤 분위기에서 2,123K, 1시간 유지한 후 로냉을 실시하여, 40 × 40 × 3mm의 소결체를 얻었다. SiC_f/SiC 복합재료는 3 × 4 × 18mm 크기로 절단하여 3점 굽힘 시험편을 제작하였으며, 인장 응력이 작용하는 표면의 결함을 제거하기 위하여 연삭 가공한 후 경면 연마하였다. Fig. 1은 SiC_f/SiC 복합재료의 소결 흐름도를 나타내고, Fig. 2는 3점 굽힘 시험을 위한 치구 및 시험

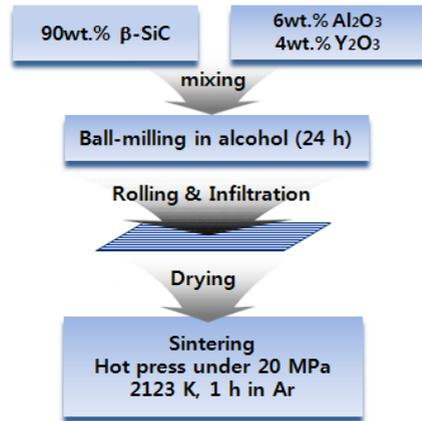


Fig. 1 Flow chart of sintering for SiC_f/SiC composite ceramics

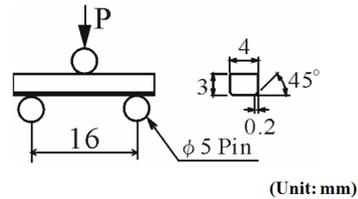


Fig. 2 Dimensions of the specimen and the three-point bending system

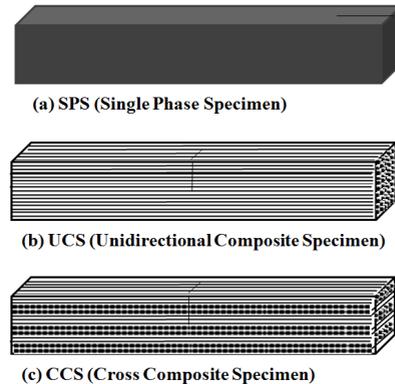


Fig. 3 The shape of specimen of SiC_f/SiC composite ceramics and monolithic ceramics

편의 치수를 나타낸다.

Fig. 3은 SiC 단상체 시험편과 SiC_f/SiC 복합재료 시험편을 나타낸다. 즉, 단상체 시험편(Single

Phase Specimen; 이후 SPS로 나타냄), 섬유를 일방향으로 함침시켜 소결한 일방향 복합재 시험편(Unidirectional Composite Specimen; 이후 UCS로 나타냄)과 섬유를 0°와 90°방향으로 순차적으로 함침하여 소결한 직교복합재 시험편(Cross Composite Specimen; 이후 CCS로 나타냄)의 형상을 나타낸다.

2.2 실험방법

시험편의 균열 치유 현상 및 강도 특성을 조사하기 위하여 3점 굽힘 시험 시 인장응력이 작용하는 경면 연마된 표면 중앙에 비커스 경도기를 이용하는 Indentation법으로 균열을 도입하였다. 특히 균열의 크기에 따른 파괴 양상을 조사하기 위하여 비커스 경도기를 이용하여 하중 24.5, 196N 및 $\Phi 1$ 드릴로 예균열을 도입하였다. 이 때 비커스 압자 압입 조건은 하중 부하 시간 5초, 유지 시간 10초, 제하 시간 5초였다. 균열 길이는 약 210 μm (하중 24.5N), 약 400 μm (하중 196N) 및 약 1000 μm ($\Phi 1$ 드릴 가공)이다.

SiO₂ 나노 콜로이드의 코팅 방법에 따른 표면균열의 강도 회복을 알아보기 위하여 담금(dip)코팅, 롤(roll)코팅 및 정수압(hydrostatic pressure)코팅의 세 가지 방법으로 표면 코팅을 실시하였다. 담금 코팅은 시험편을 SiO₂ 나노 콜로이드 용액에 담그는 방법이고, 롤 코팅은 코터바를 이용한 롤링 처리를 통하여 표면의 용액을 코팅하는 방법이다. 정수압 코팅은 밀폐된 용기에 용액과 시험편을 넣고 58.8MPa의 압력으로 10분간 유지하는 방법으로 실시하였다. SiC_f/SiC 복합재료는 담금 코팅과 정수압 코팅법을 각각 적용하였다. 균열 치유에 대한 코팅 방법의 영향을 조사하기 위한 열처리에는 1,373K에서 1시간 동안 대기 중에서 실시하였다.

SiC_f/SiC 복합재료의 균열치유를 위한 열처리는 SiC 단상 세라믹스의 최적 균열 치유 조건인 1,373K에서 1시간 동안 대기 중에서 유지하는 방법을 적용하여 실시하였다. 그리고 SiC_f/SiC 복합재료에 있어서 SiO₂ 나노 콜로이드의 코팅에 따른 균열 치유 효과를 확인하기 위하여 SiC 단상재의 최적 열처리 조건을 적용하였다.⁸⁾ 또한 SiC_f/SiC

복합재료의 열처리 온도에 따른 굽힘 강도의 상관성을 조사하기 위하여 대기 중에서 1,373-1,673K의 온도 범위에서 각각 1시간 동안 유지하는 조건으로 열처리를 실시하였다.

모재, 균열재 및 열처리재에 대한 굽힘 시험은 상온에서 스패(span) 길이 16mm, 크로스헤드 속도 0.5 mm/min의 조건으로 3점 굽힘 시험을 실시하였다. SiC_f/SiC 복합재료의 균열부에 대한 열처리 전후의 표면 변화는 SEM을 통하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SiC_f/SiC 복합재의 균열 크기에 따른 상온 굽힘 강도

Fig. 4는 SPS, UCS 및 CCS의 응력-변위 곡선으로 최대 응력까지 나타낸 그래프이다. 섬유가 함침되어 있지 않은 SPS의 경우 약 0.1mm의 변위에서 873MPa의 응력에서 취성파괴가 일어났다. 강한 공유 결합으로 형성된 SPS이므로 섬유가 배향된 재료(섬유/매트릭스 사이의 계면이 결합으로 작용)에 비하여 강도값은 우수하나 파괴인성이 극히 낮아 취성 파괴를 일으킨다.

반면 UCS와 CCS의 경우는 각각의 강도가 313MPa, 230MPa로 SPS의 3분의 1정도에 지나지 않는 낮은 강도를 보이고 있다. 이는 섬유 함유율이 약 45-50%로 체적의 절반 정도가 섬유로 이루어져 있기 때문에 매트릭스의 강한 공유결합 비율이 줄어들고, 그만큼 많은 섬유/매트릭스간의 계면이 형성되어 결합으로써 작용한 원인으로 볼 수 있다.⁸⁾ 또한 소결체를 연삭할 때, 표면의 섬유와 매트릭스 형상이 연삭 정도에 따라 변하며, 표면에 드러나는 계면층의 위치와 비율도 동시에 변하게 되는데, 이러한 거시적인 계면의 형상 및 분포의 차이는 SiC_f/SiC 복합재의 굽힘강도에 다소 영향을 미칠 것으로 판단된다.

UCS와 CCS에 대한 배향 방법과 강도의 상관성을 살펴보면, UCS는 최대 하중까지 변위가 큰 반면, CCS는 이보다 변형량이 적은 상태에서 파단에 도달한다. 이것은 UCS는 길이 방향으로 SiC섬유가 배향되어 있어, 섬유의 전체 단면적이 굽힘 하

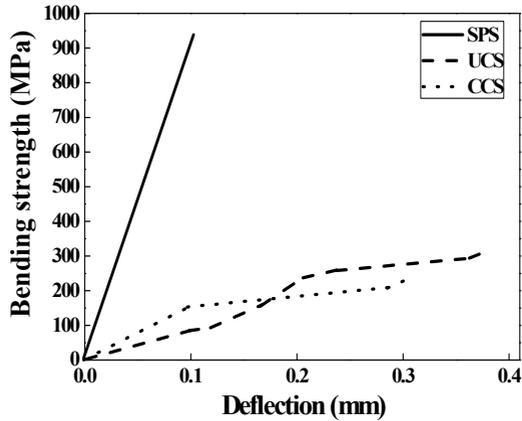


Fig. 4 Relationship between bending strength and deflection from SPS, UCS and CCS specimen

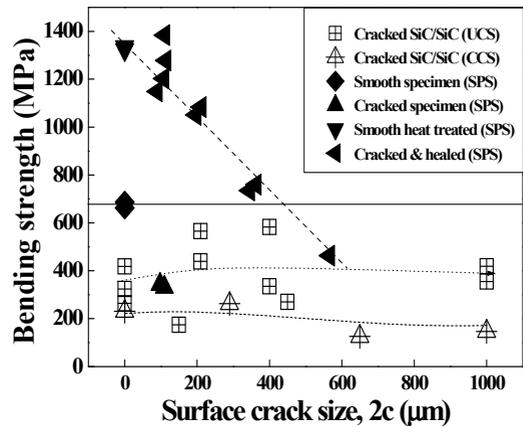


Fig. 5 Bending strength of UCS, CCS and SPS specimen according to the crack size

중을 받아 SiC_f/SiC 복합재의 인성에 기여하게 되는 반면, 섬유가 직교 배향된 CCS는 소결체 내부에서 가장 약한 결합인 섬유/매트릭스의 계면이 시험편의 길이방향과 굽힘 하중에 치명적인 수직 방향으로 배향되어 있어 보다 낮은 응력에서 단시간에 파단한 것으로 판단할 수 있다. 단, 본 연구에서 사용한 시험편의 형상이 빔 형상이 아니라고 가정한다면 이와는 다른 강도 분포를 나타낼 수도 있을 것이다.

Fig. 5는 균열 크기에 따른 굽힘강도를 나타낸 그래프이다. □는 예균열을 도입한 UCS, △는 예균열을 도입한 CCS, ◆는 SPS의 모재시험편, ▲는 SPS 균열재(균열길이 약 100 μ m), ▼는 SPS 열처리 모재(1373K, 1h), ◀는 SPS 균열치유재(1373K, 1h)를 나타낸다. SPS(◆, ▲, ▼, ◀)의 결과는 문헌의 데이터를 인용하였다.⁹⁾

SiC_f/SiC 복합재의 UCS의 균열크기에 따른 굽힘강도 특성을 분석하였다. 비커스경도기의 24.5N 하중으로 압입을 하였을 때의 균열 길이는 약 210 μ m, 196N의 경우는 약 400 μ m, 그리고 ϕ 1 드릴 가공 균열은 직경 1000 μ m, 깊이 약 260 μ m이었다. 각 균열재의 평균 굽힘강도는 502.4, 459.2 및 386.9MPa이었으며, 모재의 평균강도는 338.1MPa이었다. 이것은 SPS 모재의 평균강도 약 780MPa에 대하여 절반정도를 나타낸다. 이는 섬유가 배

향됨으로써 강한 공유결합으로 이루어진 매트릭스의 체적비율이 낮아지고 결합으로 작용할 수 있는 섬유/매트릭스 계면의 증가가 원인이라 할 수 있다. 그러나 SiC_f/SiC 복합재의 균열크기에 따른 굽힘 강도에서 주목할 점은 균열의 크기가 증가하더라도 굽힘강도에 큰 변화가 없다는 것이다. 즉 매트릭스/섬유 또는 섬유/섬유 계면층이 균열 굴절을 유도하기 때문에 어느 한계 균열 크기까지는 파괴의 원인이 균열 크기 인자만이 아닌 인장응력축 표면에 드러난 계면에서의 응력집중과 연관된다는 사실을 알 수 있다.

24.5N 압입부(균열 길이 약 210 μ m)의 압흔은 시험편 중앙에 있지만 굽힘 강도는 균열이 없는 UCS보다 약간 높다. 이것은 예균열 부분의 응력집중이 균열 발생 기점은 되지만, 균열진전은 재료의 결합인 계면을 따라 일어나고 균열 진전에너지는 풀아웃 현상과 같은 섬유/섬유 혹은 섬유/매트릭스의 접착강도를 극복하는 소모되어 취성파괴의 양상은 띄지 않게 되는 것이다. 그리고 196N 압입재(균열 길이 약 400 μ m)도 모재와 비슷한 강도를 유지하고 있으며, 가장 큰 예균열을 도입시킨 1000 μ m 홈 균열재도 위와 같은 균열진전에너지의 소모 과정에 의하여 급격한 강도 하락없이 일정 강도를 유지하고 있다. 따라서 본 연구에서 적용한 1000 μ m 이상의 임계 균열 크기까지는 SiC_f/SiC

복합재의 굽힘강도에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

CCS는 UCS보다 굽힘 강도가 낮으며, 균열 길이가 길어짐에 따라서 굽힘 강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 섬유 배향이 0/90° 방향으로 직교됨에 따라서 시험편의 폭 방향의 길이가 짧으므로 굽힘 하중에 대한 저항성이 적기 때문이라 판단된다. 그러나 폭 방향의 섬유가 길게 되면, 이러한 양상은 다르게 나타나리라 판단된다. 이것은 추후 검토의 대상이 된다.

Fig. 6은 다양한 비커스 하중으로 UCS 시험편의 크기가 다른 균열이 도입된 균열재의 3점 굽힘 시험 후의 파단 모습이다.

Fig. 7과 8은 24.5N 하중으로 균열을 도입한 UCS와 CCS의 균열진전 SEM 이미지이다. Fig. 7(b)는 측면으로 섬유/매트릭스간의 계면을 따라 균열이 진전하였음을 알 수 있다. 특히 시험편의 길이방향으로 CCS보다 섬유/매트릭스 계면 분리가 상당히 발생하였다. 섬유 분리에 의한 균열의 진전도 길이 방향을 따라 더 넓은 영역에 걸쳐 일어나고 있으며, 섬유가 적층된 전 영역에서 박리가 일어나고 있다. Fig. 7(a) 표면은 비커스 예균열 (c)를 파괴 기점으로 섬유/매트릭스 계면을 따라 균열이 진전하고 있다. Fig. 7(c)에서 예균열은 표

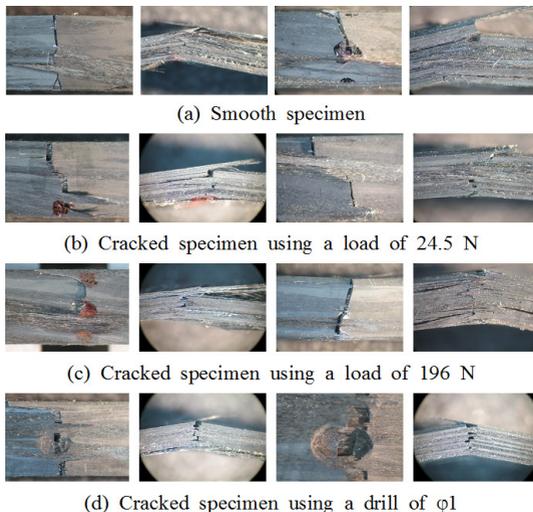


Fig. 6 The fracture image of cracked UCS specimens

면의 섬유부분에 도입되어 섬유가 국부적으로 모두 끊어진 것을 확인할 수 있다. 이처럼 섬유가 모두 끊어져 응력집중원이 될 수 있는 균열임에도 불구하고, 균열은 주변의 섬유/매트릭스 계면을 따라 진전하고 있으며, 표면에 존재하는 매트릭스 부분에서의 균열 진전은 SPS와 같은 양상으로 최대한 장응력이 작용하는 방향으로 진전하다가 섬유/매트릭스 계면에서는 균열진전방향이 굴절되어 박리가 발생하게 된다. 표면(a)는 CCS 측면에 비하여 넓은 영역에 걸쳐 박리가 일어남을 알 수 있다.

Fig. 8(b) 측면은 인장 응력 축의 시편 길이 방향에 대하여 90°로 배향된 섬유들이 있다. 이 수직 방향의 계면이 가장 약한 결합을 하고 있고, 인장 응력축의 중앙에 위치하고 있기 때문에 파괴 기점이 되었음을 알 수 있다. 이와 같은 현상이 시험편

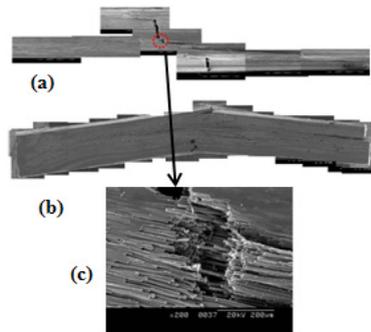


Fig. 7 SEM image of UCS after bending test; (a) surface, (b) side, (c) enlargement of circle (a)

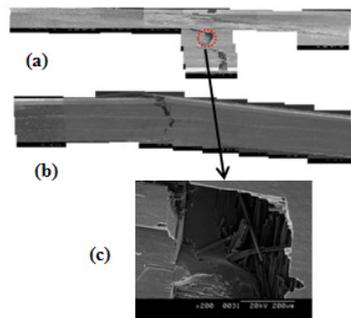


Fig. 8 SEM image of CCS after bending test; (a) surface, (b) side, (c) enlargement of circle (a)

의 중심을 따라 압축응력표면까지 같은 양상으로 일어나고, 시험편의 길이방향으로 박리도 UCS 측면(b)에 비하여 적게 일어났다. 표면(a)은 소결체의 연삭 시 표면에 드러난 섬유/매트릭스 계면을 따라 균열이 진전하고 있다. 표면(a)의 확대 사진인 (c)은 표면에 도입된 예균열의 모습으로 압자가 압입된 부분의 섬유는 모두 끊어진 상태이며, 예균열이 표면의 매트릭스 부분에 도입되었지만, 섬유/매트릭스의 계면을 따라 진전하고 있다. 측면(b)와 마찬가지로 시험편의 길이 방향에 대하여 수직 방향의 섬유/매트릭스 계면에서 파괴가 일어나 압축 측까지 진행되고 있음을 알 수 있다.

3.2 SiC_f/SiC 복합재의 SiO₂ 나노 콜로이드 코팅법에 따른 균열 치유 특성

원료 분말인 SiC의 최적 열처리 조건을 SiC_f/SiC 복합재료에 적용하여 파괴 기점에서의 균열 치유 가능성을 조사하였다.⁸⁾ 또한 효과적인 균열 치유를 위하여 SiO₂ 나노 콜로이드 용액에 담금 코팅하여 열처리를 실시하였다. Fig. 9에서 UCS 모재의 평균 굽힘강도는 약 390MPa인데 반하여, CCS 모재는 섬유 배향의 방향성으로 이보다 낮은 250MPa의 굽힘 강도를 나타내었다. 이것은 SPS 단상재에 비하여 굽힘강도는 절반 이하의 값을 나

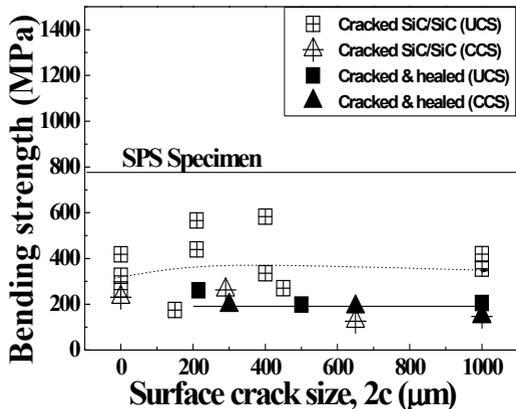
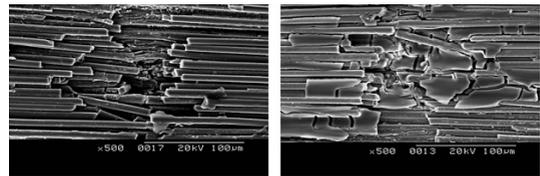


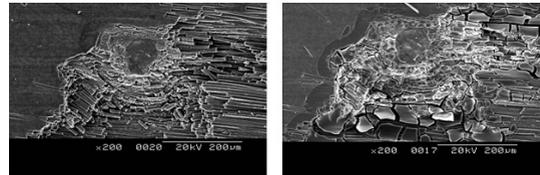
Fig. 9 Bending strength of heat-treated UCS and CCS specimen with SiO₂ nano colloid coating by dip coating method

타낸다. UCS 균열재는 모재와 거의 같은 굽힘 강도를 나타내고, CCS 균열재는 균열 길이가 증가함에 따라서 강도의 저하가 나타났다. 그러나 UCS 균열 치유재는 균열 길이에 관계없이 약 200MPa를 나타내고 있다. 한편 CCS 균열 치유재는 CCS 균열재와 거의 같은 굽힘 강도 거동을 나타내며, 균열 길이 1000μm에서 약 176MPa로 더 낮은 굽힘 강도를 나타내었다. 이것은 뒤에서 나타내는 사진에서 알 수 있듯이 섬유의 배향 방향과 균열 치유재의 경우, 계면 부분의 균열이 치유되지 못한 것이 원인이라 판단된다.

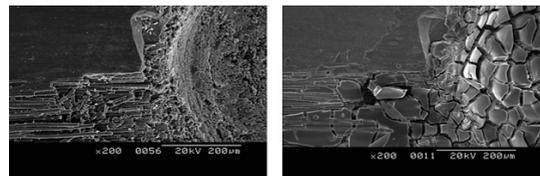
Fig. 10은 SiO₂ 나노 콜로이드 용액에 담금 코팅한 균열재의 표면 치유 상태를 SEM으로 관찰한 것이다. (a)와 (b)는 균열의 길이가 215-600μm까지 증가하여도 압입부 및 균열 진전부에서는 SiC 단상재에서 관찰된 균열치유 현상이 없었으며, 섬유/섬유 계면 및 섬유/기지 계면에서도 균열이 치유된 모습을 관찰할 수 없었다. 그리고 φ1 드릴의



(a) Before and after crack-healing of length 215 μm



(b) Before and after crack-healing of length 500 μm



(c) Before and after crack-healing using a drill of φ1

Fig. 10 The surface before-and-after crack-healing with dip coating of SiO₂ nano colloid on UCS cracked specimen

균열재(c)도 균열이 치유되지 않았다. 이것으로부터 SiO₂ 나노 콜로이드를 도포하여 열처리를 하여도 섬유/매트릭스 계면 또는 섬유/섬유 계면과 같이 폭이 넓은 균열부를 치유하기 위한 SiO₂ 산화물과 같은 균열치유물질의 생성이 어렵기 때문에 굽힘 강도의 회복에는 기여할 수 없음을 알 수 있었다.

이에 계면에 더욱 효과적인 균열 치유 물질의 형성을 위하여 정수압을 가하여 SiO₂ 나노 콜로이드 용액을 침투시켰다. Fig. 11은 정수압 처리 후 동일한 조건에서 열처리를 실시한 SiC_f/SiC 복합재의 표면 SEM 이미지이다. 압입 하중이 커짐에 따라 균열의 크기가 증가하고 있으며, 표면에는 SiO₂ 나노 콜로이드의 코팅에 의하여 생성된 산화물이 다량 관찰되었다. 그러나 담금(Dip) 방법으로 코팅한 Fig. 10의 표면과 유사한 형태로 산화물이 형성되어 있으며, (b)와 같이 섬유/섬유 사이 계면에서의 균열치유 또한 일어나지 않고 표면에만 불규칙적으로 생성되었음을 확인할 수 있다. 따라서 SiC_f/SiC 복합재에 대하여 SiO₂ 나노 콜로이드 용액을 정수압을 가하여 침투시켜도 계면과 같은 비교적 큰 균열의 치유에는 효과가 없는 것으로 판단된다.

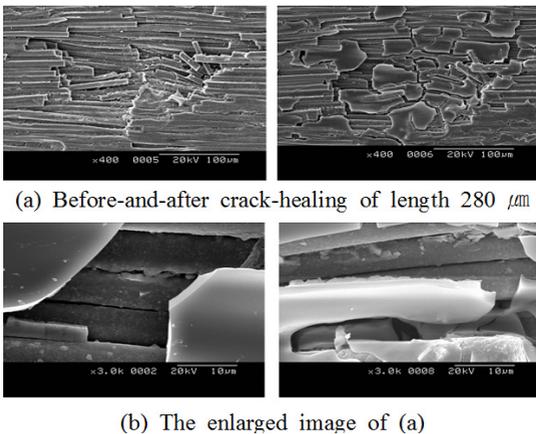


Fig. 11 The surface before-and-after crack-healing of UCS coated SiO₂ nano colloid with the hydrostatic pressure process

3.3 SiC_f/SiC 일방향 복합재(UCS)의 열처리 조건에 따른 균열 치유 특성

Fig. 12는 SiC_f/SiC 일방향 복합재(UCS)를 각각 1,373-1,673K의 온도 영역에서 1시간 동안 유지시킨 후, 로냉 한 시험편을 3점 굽힘 시험한 결과이다. 그리고 그래프상의 좌측 결과는 SiC 기지재의 모재, 모재 열처리재, 균열재 및 균열치유재의 굽힘 강도를 나타낸 선행 결과이다. 약 100 μm 길이의 비커스 예균열이 도입된 균열재만이 SiC_f/SiC 일방향 복합재의 굽힘 강도와 유사한 강도값을 나타내고 있다. 즉, SiC_f/SiC 일방향 복합재는 열처리 유무에 관계없이 모두 SiC 단상 세라믹스의 모재 평균 굽힘 강도의 절반정도에 해당하는 낮은 값을 나타냄을 알 수 있다. 특히, SiC 단상 세라믹스의 최적 열처리 조건이라 할 수 있는 1,373K에서 1시간 유지하는 조건을 SiC_f/SiC 일방향 복합재에 적용시켜도 SiC 단상 세라믹스의 결과와 같은 현저한 강도의 회복, 균열 치유 거동은 관찰되지 않는다. 이는 섬유가 배향됨으로써 강한 공유결합으로 이루어진 매트릭스의 체적비율이 낮아지고 결합으로 작용할 수 있는 섬유/기지 계면이 증가한 원인이다. 굽힘 강도의 변화 양상에 있어서 주목할 점은 SiC 단상 세라믹스에서와 같은 균열 치유 거동이 SiC_f/SiC 일방향 복합재(UCS)에서는 일어나지

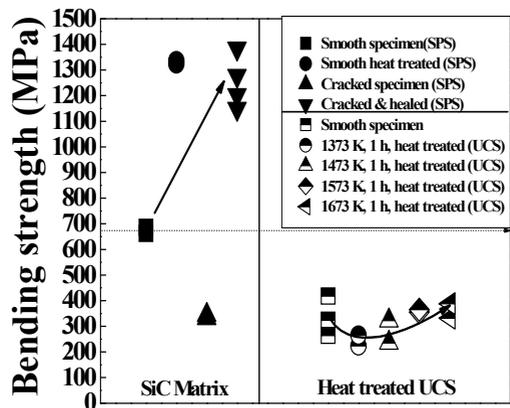


Fig. 12 Bending strength of unidirectional composite specimen(UCS) according to the heat-treatment temperature

않는다. SiC_f/SiC 일방향 복합재의 모재 평균 굽힘 강도가 약 334MPa이지만, 열처리를 한 경우, 1,373K에서 1시간 유지한 조건의 굽힘 결과는 약 244MPa로 오히려 감소하고, 1,673K의 고온 열처리 조건으로 갈수록 굽힘 강도는 모재수준으로 회복되나, Fig. 13의 응력-변위 그래프에서와 같이 모재 시험편에서 보였던 준연성 파괴 거동은 열처리 조건이 고온이 될수록 나타나지 않고 취성파괴 거동을 보임을 확인할 수 있다. 즉, SiC_f/SiC 일방향 복합재(UCS)의 균열 치유를 위해 고온에서 열처리를 하면 계면 접착 강도가 감소하여 파괴 인성이 저하되는 것으로 판단된다.

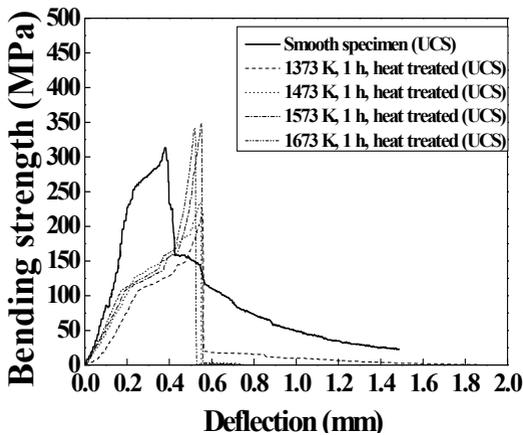


Fig. 13 Strength-deflection curve of unidirectional composite specimen (UCS) according to the heat-treatment temperature

4. 결 론

본 연구에서는 NITE법을 이용하여 제조된 SiC_f/SiC 복합재의 표면균열 크기에 따른 파괴 특성을 조사하였으며, 표면 균열에 SiO₂ 콜로이드를 도포하여 균열치유 가능성에 대하여 알아보았다. 또한 더욱 효과적인 균열 치유를 위하여 정수압으로 SiO₂ 나노 콜로이드를 균열 저부까지 침투시키는 방법을 적용하여 균열치유 가능성을 향상시키고자 하였다.

(1) UCS와 CCS의 강도는 각각 313MPa, 230MPa

로 SPS의 3분의 1정도이었다. 이것은 45-50%의 섬유 보강에 의하여 형성된 계면에서 균열 발생 및 매트릭스의 체적 감소가 원인이며, 빔 형상의 구조일 경우, 길이방향에 수직 배향된 섬유를 포함하고 있는 CCS는 더욱 낮은 굽힘 강도를 나타내었다.

(2) SiC_f/SiC 복합재의 표면균열은 파괴의 기점이 되지만, 균열진전에너지가 섬유/섬유 혹은 섬유/매트릭스의 계면접착강도를 극복하는데 소모되어 단상체 세라믹스와 같은 취성파괴는 일어나지 않는다. 즉, SiC_f/SiC 복합재의 굽힘 강도는 임계 균열 크기까지 예균열의 크기와는 무관한 것으로 판단된다.

(3) SiC_f/SiC 복합재는 섬유/섬유 또는 섬유/매트릭스의 계면 분리에 의하여 균열이 진전되므로 SiC 단상체와 같은 하중 조건에서 형성되는 균열의 크기가 크고 폭 또한 넓다. 따라서 SiO₂ 나노 콜로이드를 담금 코팅하거나 정수압 코팅 처리를 하고 열처리를 하여도 SiO₂ 산화물이 균열 저부까지 충분히 생성되지 않고 표면에만 불규칙적으로 생성되어 굽힘 강도의 회복에는 기여할 수 없다.

(4) SiC 단상 세라믹스의 최적 열처리 조건을 SiC_f/SiC 복합재에 적용시킬 경우, SiC 세라믹스에서 보이는 강도의 회복, 균열 치유 거동은 일어나지 않으며, 오히려 계면 접착 강도가 감소하여 파괴 인성이 저하되는 것으로 판단된다.

References

1. C. B. Charles, 2000, "Advances in fusion technology", Journal of Nuclear Materials, Vol. 283-287, pp. 1-9.
2. A. Kohyama, M. Seki, K. Abe, T. Muroga, H. Matsui, S. Jitsukawa and S. Matsuda, 2000, "Interactions between fusion materials R&D and other technologies", Journal of Nuclear Materials, Vol. 283-287, pp. 20-27.
3. Y. Katoh, A. Kohyama, T. Nozawa and M. Sato, 2004, "SiC/SiC composites through transient eutectic-phase route for fusion applications",

- Journal of Nuclear Materials, Vol. 329-333, pp. 587-591.
4. S. K. Lee, W. Ishida, S. Y. Lee, K. W. Nam and K. Ando, 2005, "Crack-Healing Behavior and Resultant Strength Properties of Silicon Carbide Ceramic", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 25, pp. 569-576.
 5. W. Nakao, S. Mori, J. Nakamura, K. Takahashi, and K. Ando, 2006, "Self-Crack-Healing Behavior of Mullite/SiC Particle/SiC Whisker Multi-Composites and Potential Use for Ceramic Springs" J. Am. Ceram. Soc., Vol. 89, pp. 1352-1357.
 6. Y. Katoh, S. M. Dong and A. Kohyama, A, 2002, "Thermo-mechanical properties and microstructure of silicon carbide composites fabricated by nano-infiltrated transient eutectoid process", Fusion Engineering and Design, Vol. 61-62, pp. 723-731.
 7. A. Hasegawa, A. Kohyama, R. H. Jones, L. L. Snead, B. Riccardi and P. Fenici, 2000, "Critical issues and current status of SiC/SiC composites for fusion", Journal of Nuclear Materials, Vol. 283-287, pp. 128-137.
 8. W. Yang, H. Araki, A. Kohyama, H. Suzuki and T. Noda, 2005, "Effects of SiC sub-layer on mechanical properties of Tyranno-SA/SiC composites with multiple interlayers" Ceramics International, Vol. 31, pp. 525-531.
 9. K. W. Nam and J. S. Kim, 2010, "Critical crack size of healing possibility of SiC ceramics", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 3236-3239.